

波動場におけるブロック潜堤間隙内の三次元流体運動 に関する実験的研究

重松孝昌* ・渡部靖憲**・竹原幸生***
奥村悠樹****・小池敏也*****

従来、測定が困難であった多孔質構造物間隙内の三次元流体運動を計測するシステムの構築を行っている。構造物と流体の屈折率を調整することにより、物体背後の構造物および流体を視認することができ、さらに、拡張型三次元ステレオグラム PTV 流速計測システムを用いることにより、間隙内流体運動の計測が可能になっている。新たに中立粒子の開発も行っている。構築したシステムを用いて、波動場におけるテトラポッド潜堤の間隙流体運動の計測を行い、三次元流速分布および乱れエネルギーの空間分布について考察している。

1. はじめに

日本の海岸の約 45% は人間の手が加えられた海岸であるが、中でも波浪制御、漂砂制御などの目的で数多くのブロック堤体が設置されている。ブロック傾斜堤や被覆堤の法先の洗掘やブロックそのものの埋没現象さらにブロックの局所破壊等の事例報告が多数あるが、それらの発生メカニズムには未解明な部分が多い。ブロック堤体間隙の流体はその複雑な形状による加速・減速効果を受け、さらに固液干渉による乱れが生成するため、堤体による波浪エネルギーの効果的な減衰効果の代償として、ブロックや支持底層の局所的不安定を定常的にもたらしつつあると考えられる。こうした間隙内局所乱流に伴う流体力の正確な評価は、ブロックや支持底層の局所的安定および長期間に渡る構造物自体の機能維持の予測には不可欠であり、新たな性能照査型設計法の構築に必要である。しかしながら、多孔質構造物の間隙流速の測定が困難であるために、未解明な部分が多く残されたままとなっている。

本研究は、多孔質構造物内部に作用する局所乱流流力推定法を構築することを最終的な目的としている。ここでは、代表的な多孔質構造物として消波ブロック潜堤を対象としてその三次元間隙流速を計測する実験法を提案すると共に、三次元局所流速場および乱れの構造特性について実験的知見を得ることを目的とする。

2. 実験概要

電磁流速計やレーザードップラー流速計、超音波式ドップラー流速計等の従来の計測機器では、多孔質体を構成する構造物による機器の設置や音・光の伝播阻害のために、多孔質構造物内の流速を測定することは困難である。また、同時に多点の情報が得られることから流速場の時・空間構造の把握に有効と考えられる PIV, PTV

計測システムにおいても、多孔質体内部の画像を収集することが困難であったため、多孔質体内の流速場に関する実験的知見は殆どないのが実状である。

江藤ら (1996) は、このような課題を克服するため、Refractivity-Matching と称して、液体と屈折率の等しい材料で水中物体を製作すれば物体に遮られることなく光が直進し、物体背後の流体場の計測や他の物体の運動も計測することができると提案している。井田 (1995) は、この提案を具現化し、流体として重量百分率 64% のヨウ化ナトリウム水溶液を、物体製作のための透明材料としてメタクリル酸メチルを用いて、振動流場中のテトラポッド群内の流体運動の計測を試みている。流体運動の解析には竹原ら (1992, 1996) が開発した粒子自動追跡アルゴリズムに基づく PTV 法を用い、レーザーシート内のトレーサー粒子の 2 次元運動を計測している。しかし、テトラポッド群内部では流体運動の三次元性が強く、二次元計測ではトレーサー粒子の対応が悪くなるため、実際の流体場の解析は、テトラポッド群の境界部外縁に限定されている。また、物体製作の過程で危険物質を取り扱うなど、化学薬品の取り扱い易さにも課題を有していた。高野ら (2001) は、この操作性の課題を克服するため、物体製作に取り扱いの容易なシリコン (信越化学: KE 108) を、また、液体として重量百分率約 40% のヨウ化ナトリウム溶液を用いる実験システムを提案し、真球で構成された透過性構造物内の流体運動の計測に成功している。

本研究では、高野ら (2001) と同様にシリコンを用いてテトラポッド模型を製作し (図-1 参照)、これを 4 段積みの消波ブロック潜堤 (図-2 参照) として波動水槽内 (長さ 4 m, 幅 25 cm, 高さ 50 cm) に設置し (図-3 参照)、波動場における消波ブロック潜堤内部の流体運動を計測した。

流体には高野ら (2001) と同様に、ヨウ化ナトリウム溶液を用いた。三次元性が強く現れる消波ブロック潜堤内部の流速の測定には、奥村ら (2001) が開発した拡張型三次元ステレオグラム PTV システムを用いた。水深 h は 10 cm と一定にし、周期 T は 0.6 秒および 0.9 秒の

* 正会員 工博 大阪市立大学大学院講師 工学研究科

** 正会員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科

*** 正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部社会環境工学科

**** 工修 JR 東日本 (株)

***** 大阪市立大学事務局学術交流課技術支援係

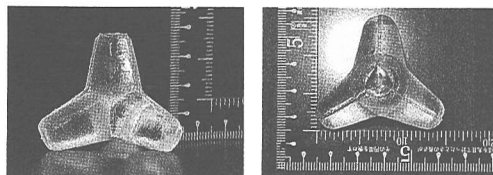


図-1 テトラポッド模型

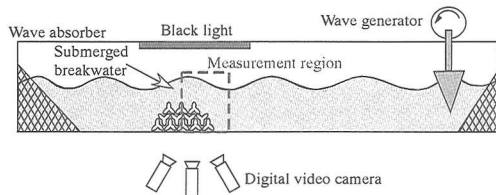


図-3 実験装置

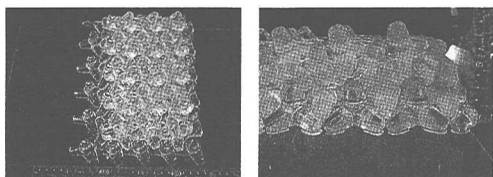


図-2 消波ブロック潜堤模型

2 ケースを行った。目視により波高を測定した結果、 $T = 0.6$ 秒の場合の波高 H は $H = 1.5$ cm、 $T = 0.9$ 秒の場合のそれは $H = 2.0$ cm であった。なお、作成した消波ブロック潜堤の底辺は約 17 cm、天端幅は約 10 cm、天端上水深は約 2.5 cm であった。

当初の実験では、消波ブロック潜堤全体がビデオ画像に収まるように撮影して画像解析を試みたが、水深に比して水平距離が長いアスペクト比の大きな計測領域となってしまう、空間解像度が粗い計測となってしまうことが判明した。そこで、ここでは、消波ブロック潜堤の沖側半分のみを計測対象領域とした。拡張型ステレオグラム PTV で必要なキャリブレーションは、撮影対象空間内にキャリブレーションポイントを 1 cm 毎に設定し、これをビデオカメラで撮影し、得られた画像座標と実座標の関係から決定した。

実験に際して、新たに蛍光中立トレーサーを開発した。開発された蛍光中立トレーサーは、平均粒径が約 100 μm のポリ塩化ビニールとガラス粉末を混合し、その表面に蛍光塗料が塗られたもので、比重は 1.4 程度、粒径は 0.1 mm 程度のものから数 mm 程度のものまで作成することができる。今回の実験には、1~2 mm 程度の粒径のものをを用いた。このトレーサーを計測対象領域内に投入し、ブラックライトで照射して発光させ、3 台のデジタルビデオカメラで撮影した。カメラの解像度は 640×480 ピクセルで、撮影周波数は 30 Hz である。

3. 実験結果

図-4 に、得られたビデオ画像の一例を示す。同図より明かなように、シリコンで製作されたテトラポッドはほとんど識別できず、その間隙内に浮遊する中立トレーサーがブラックライトによって蛍光している様子が鮮明に捉えられていることがわかる。このことより、本研究

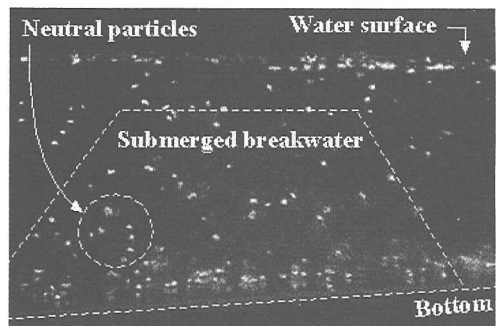
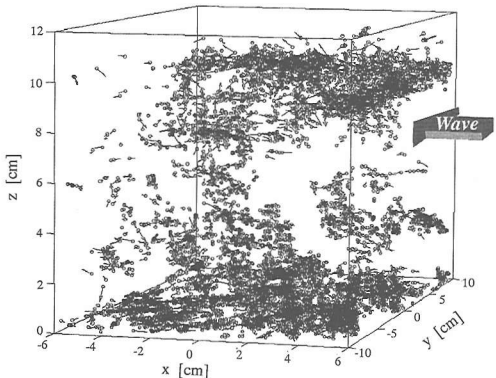


図-4 得られたビデオ画像の一例

で提案する実験システムを用いれば、PIV あるいは PTV システムを用いて多孔質構造物内の流速の計測が可能であることが確認された。

図-5 は、周期 $T = 0.9$ 秒の場合の、一周期間に拡張型ステレオグラム PTV によって検出されたブロック潜堤内外の中立トレーサーの位置および速度ベクトルを示したものである。図中の矢印は、波の進行方向を示している。同図では、水表面 ($z = 10$ cm) および水底 ($z = 0$ cm) 付近に数多くのトレーサーが認識されているが、ブロック潜堤内部 ($2 < z < 7$) においてもトレーサーが運動している様が認識されていることが判る。また、部分的にトレーサーが高濃度で検出されている場所やまったく検出されていない場所があることから、ブロック潜堤内の間

図-5 解析された中立トレーサーの軌跡 ($T = 0.9$ 秒)

隙位置あるいはブロック位置が推定できることがわかる。このように、本実験システムを用いることによって、多孔質体内部の三次元流速が初めて計測されたと言える。

エルゴード性を仮定すれば、各位相毎に検出されたトレーサーの速度ベクトルを空間的に足し合わせることによってその位相の流体速度ベクトルの分布と見なすことができる。更に、計測対象領域を一边が1 cmの立方体で分割し、それぞれの立方体内で検出されたトレーサーの速度ベクトルの平均値を取ることによって、空間平均流速ベクトルを得ることができる。すなわち、

$$\langle \vec{V} \rangle_i = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} \vec{V}_n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\vec{V}_i$: i 番目のセルにおける空間平均流速ベクトル、 N_i : i 番目のセル内で検出されたトレーサーの数、 $\vec{V}_n$: セル内で検出されたトレーサーの流速ベクトルである。図-6 は、このようにして求められた空間平均流速ベクトルの分布 ($t/T=5/6$, $T=0.6$ 秒) を示したものである。同図より、底面近傍では流速が小さく、潜堤上の水面近傍で比較的大きな流速ベクトルが計測されていることが見て取れる。また、消波ブロック潜堤内では、部分的に潜堤上と同じスケールの流速が計測されている箇所もあれば、まったく流速が計測されていない箇所も見られる。

図-7 は、次式で求められるような乱れの運動エネルギーの空間分布を示したものである。すなわち、

$$k_i = \frac{1}{2N_i} \sum_{n=1}^{N_i} (\vec{V}_n - \langle \vec{V} \rangle_i)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

k_i の空間分布を3次元表示することは難しいので、図-7 は、 $z=1, 3, 6, 9$ cm の位置における xy 平面内の分布として示しており、位相は図-6 と同じ位相である。同図によれば、 $z=9$ cm および $z=1$ cm においては、比

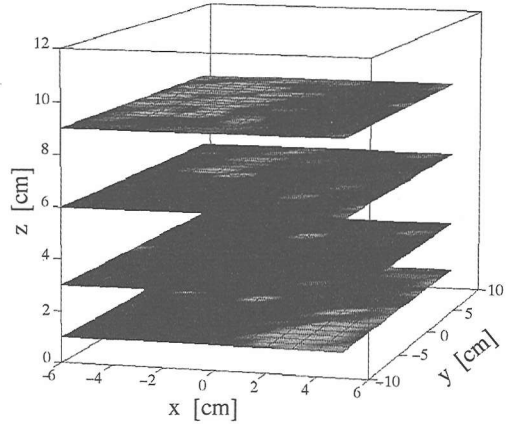


図-7 乱れの運動エネルギーの空間分布 ($T=0.6$ 秒)

較的大きな乱れの運動エネルギーが発生していること、また、ブロック潜堤内の $z=3$ cm, 6 cm においても、乱れの運動エネルギーがやや大きい場所が計測されていることがわかる。同図は、流体が通過し得ないブロック内部と、流体が流れ得る空隙内ではあるけれどもトレーサーが検出されなかったために乱れエネルギーが算出されなかった場所とが、同様に表現されていることに注意されたい。

図-8 は、 $T=0.9$ 秒の場合の乱れの運動エネルギー k_i の時間変化を示したものである。いずれの位相に於いても $z=9$ cm の xy 平面においては乱れの運動エネルギーが大きな値 ($10^2 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ のオーダー) を示している。これに対して、底面近傍の $z=1$ cm の乱れの運動エネルギーは、間欠的かつ局所的に大きな値 ($10^2 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ のオーダー) を示すことがわかる。また、ブロック潜堤内では、流体が運動し得る空隙と思われる場所で、乱れの運動エネルギーが有意な値 ($10^1 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ のオーダー) を示している。

実験における中立トレーサーの運動の観察によれば、底面近傍で波動運動に同調するように運動していたトレーサーが、突然、ブロック潜堤空隙内を上方に速い速度で上昇してゆく現象がしばしば見られた。このことは、ブロック潜堤内部で間欠的に流速が速くなる現象が生じることを意味しており、このような流速の急激な変化に伴って、乱れの運動エネルギーの急激な変化として図-8 に現れているのかもしれない。このような流体運動の急激な変化によって潜堤を構成するブロックに衝撃的な流体力が作用することも予測される。

図-9 は、各位相毎に求められたアンサンブル空間平均流速から、ブロック堤体内間隙平均流速成分 ($z \leq 7.5$ cm) (同図(a)) とブロック堤体天端上 ($7.5 \text{ cm} \leq z$) の流体の平均速度成分 (同図(b)) を示したものである。トレーサーが検出できなかったセルの流速を0としてその

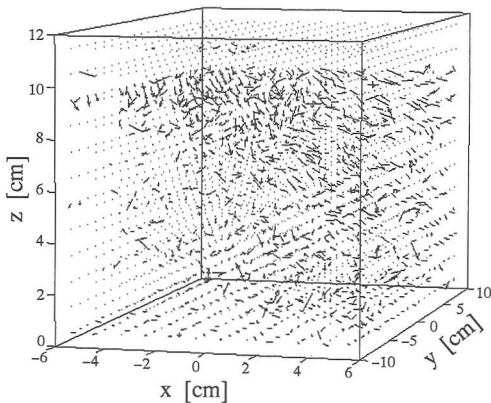
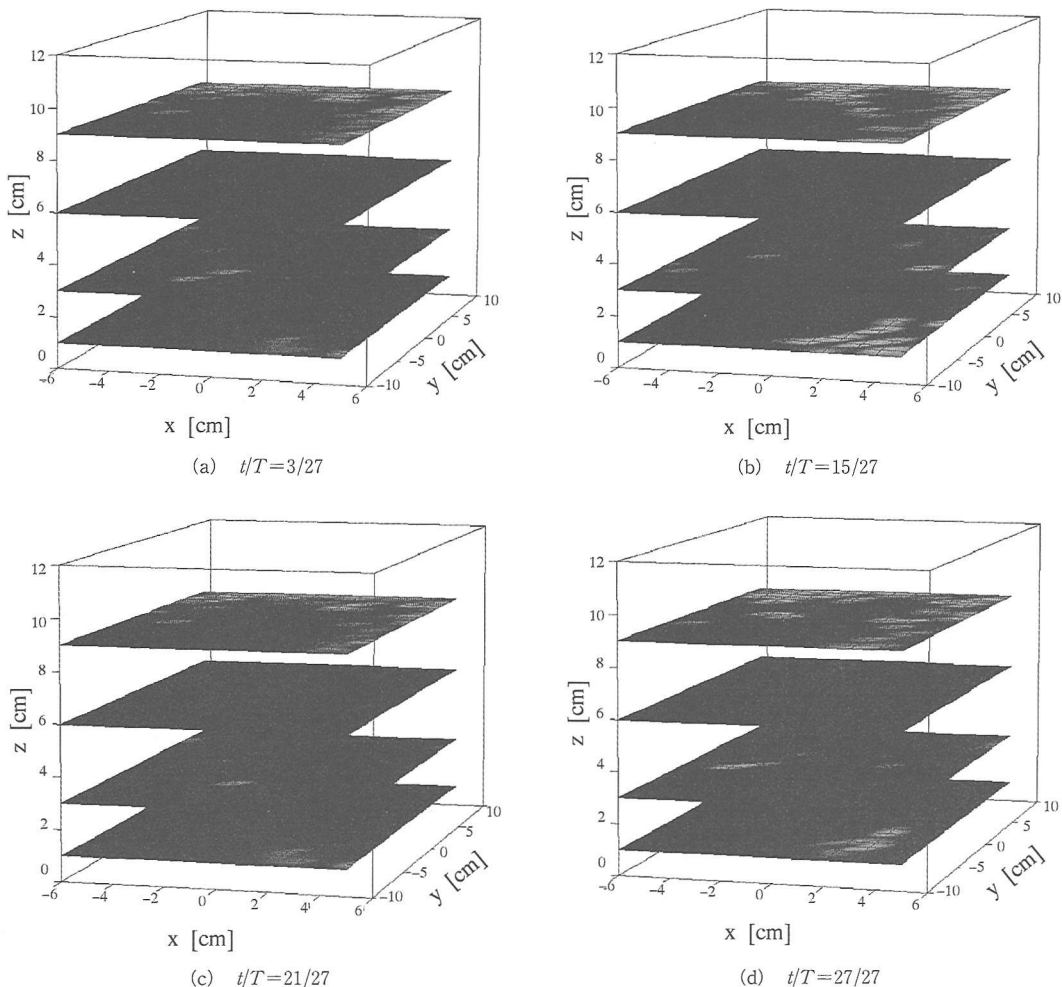


図-6 アンサンブル空間平均速度ベクトル ($T=0.6$ 秒)

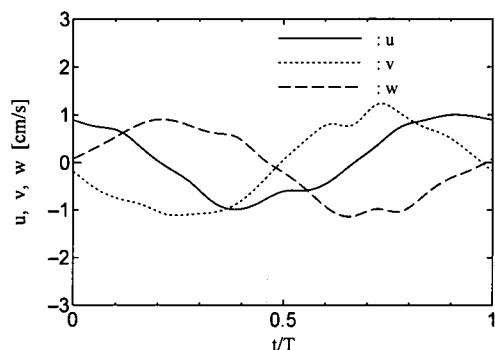
図—8 乱れ運動エネルギーの時間変化 ($T=0.9$ 秒)

まま平均操作を施しているのので、同図の速度成分は実際よりも過小評価していることに注意されたい。図—9から、潜堤の内外に関わらず、波の進行方向に垂直な方向の y 軸方向に波動に起因する流速(u, w)と同程度の流速成分 v が計測されていること、流速成分 v の位相は w の位相とおよそ π だけずれていることがわかる。図—10は、流速成分と同様に乱れの運動エネルギーの経時変化を示したものである。図—10においても、 v^2 が u^2 や w^2 の2倍あるいはそれ以上の値を示している。これらの図より、テトラポッド潜堤上を波が透過する際には、潜堤上および潜堤内部に於いても、波峰方向の流体運動および乱れの運動エネルギーが励起されていることがわかる。このような波峰方向の流体運動が誘起されるのは、潜堤内空隙の三次元構造が原因であると考えられる。波動運による流体運動成分(u, w)よりも大きな運動を示す理由については、波峰方向への流体運動がより容易な

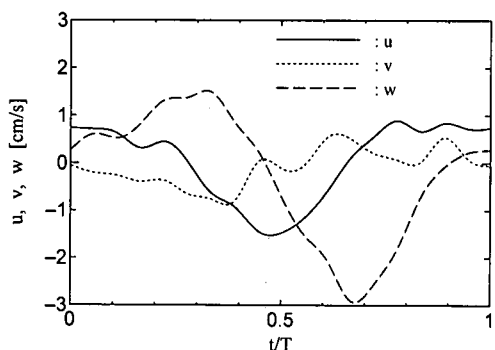
空隙構造となっているのではないかと想像される。そして、このような卓越した波峰方向の流体運動の誘起、および大きな乱れの生成が、テトラポッド潜堤の効果的な消波効果と密接な関係があるのではないかと推察される。

4. 結 論

本研究では、シリコン、ヨウ化ナトリウム水溶液、拡張型三次元ステレオグラム PTV 流速計測システムを用いることによって、従来、計測が困難であった多孔質構造物内部の三次元間隙流速を計測する実験法を構築・提案した。また、このシステムに必要な中立トレーサとして、ポリ塩化ビニールとガラスビーズを用いて新たに中立トレーサを開発した。代表的な多孔質構造物としてテトラポッド消波ブロック潜堤を対象とし、その間隙流速の計測を試みた。その結果、ブロック潜堤内の三次

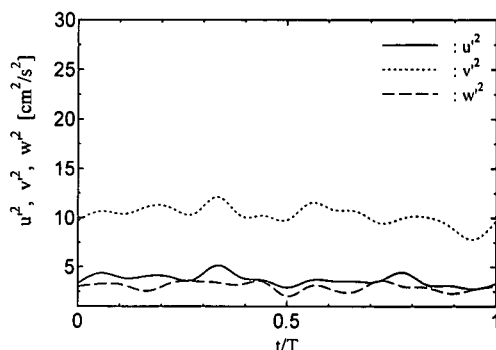


(a) 潜堤内間隙

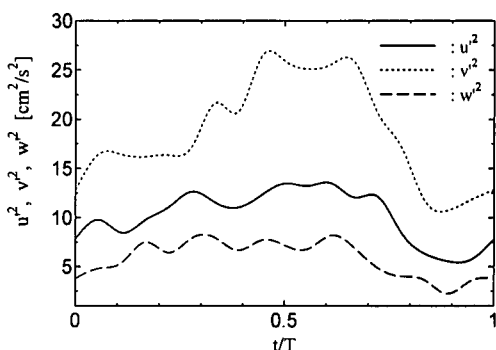


(b) 潜堤上

図-9 アンサンブル位相平均速度の経時変化



(a) 潜堤内間隙



(b) 潜堤上

図-10 乱れの運動エネルギーの経時変化

元流体運動の計測が可能であることが確認された。また、潜堤内の三次元局所流速場や乱流場の構造特性についてその概要を把握することができた。

謝辞：本研究の遂行にあたり、テトラポッド模型の製作には、大阪工業大学井田康夫助教授ならびに(株)テトラ、(株)茨城計測にご助力いただいた。また、近畿大学理工学部の高野保英助手には、多大なご助力を頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。最後に、本研究は、大阪市立大学大学院工学研究科工学研究スカラシップの補助を受けて行われたものであることを付記する。

参 考 文 献

井田康夫 (1995): 直立式透過性構造物における波変形の研究,

大阪大学学位論文, 107 p.

江藤剛治・竹原幸生・横山雄一・井田康夫 (1996): 土木学会論文誌, No. 533/II-34, pp. 87-106.

奥村悠樹・渡部靖恵・加藤雅也・佐伯 浩 (2001): 砕波帯内の3次元流速の実験的評価—拡張型3次元ステレオグラムPTVの開発と応用—, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 96-100.

竹原幸生・江藤剛治 (1992): 自動粒子追跡アルゴリズム, 可視化情報, Vol. 12, Suppl. No. 1, pp. 215-218.

竹原幸生・江藤剛治・村田 滋・道奥康治 (1996): PTVのための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文誌, No. 533/II-34, pp. 107-126.

高野保英・田中健司・重松孝昌・江藤剛治・竹原幸生 (2002): 屈折率整合法による多孔媒体中のPTV, 可視化情報学会誌, Vol. 22, Suppl. No. 1, pp. 197-200.